干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

中国苜蓿施肥产量效应的Meta分析

才　璐[1]，　王林林[2]，　罗珠珠[1,2]，　李玲玲[2]，
牛伊宁[2]，　蔡立群[1,2]，　谢军红[2]

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院，甘肃　兰州　730070；
2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室，甘肃　兰州　730070)

摘　要： 探究不同生境下苜蓿产量对施肥的响应，为苜蓿种植提供理论依据。以中国为研究区域，以不施肥苜蓿为对照，通过检索文献整合已发表的相关田间试验数据，采用整合分析法（Meta-analysis），系统探究苜蓿产量对不同肥料的响应及与生境的关系。结果表明：(1) 施肥均有显著增产效应（P<0.05），增产率为15.4%~198.2%，其中尤以化肥与有机肥配施增产效果明显。(2) 不同降雨条件下施肥效果迥异，降雨量<400 mm的干旱半干旱地区单施氮肥对苜蓿的增产作用较低，应注重磷肥、钾肥和有机肥的施用；降雨量400~800 mm的半湿润区适宜施用有机肥，其增产率可达70.1%（P<0.05）；降雨量>800 mm的湿润区氮磷钾配施的增产效应最高，为29.2%（P<0.05）。(3) 土壤类型影响施肥的增产效应，肥力较低的土壤（栗钙土和黄绵土）单施有机肥可明显提高苜蓿产量；贫磷土壤（黑垆土）单施磷肥的增产率最高，为183.0%（P<0.05）。该研究可为不同降雨条件和不同土壤类型区苜蓿人工草地合理施肥措施的选择提供理论依据。

关 键 词： 苜蓿；施肥措施；产量；整合分析法

文章编号： 1000－6060(2021)03－0838－11(0838～0848)

苜蓿是一种优质的多年生豆科草本植物，素有“牧草之王”的美称，具有优质的饲草生产性能，兼具抗旱耐寒及水土保持等生态适应性。近年来随着畜牧业的发展和退耕还草的需求，苜蓿种植面积逐年扩大[1]。苜蓿生产优劣与土壤肥力息息相关，其产量及品质因土壤营养元素的不同而具有较大差异，合理的施肥管理可及时补充土壤中亏缺的养分[2-4]，以保证苜蓿优质高产[1,5]。

施肥作为可调控的重要技术措施，直接影响苜蓿的产量和经济效益[6]。美国West Lafayette南部[7]，2龄苜蓿施磷肥增产率达30%；4龄苜蓿施磷钾肥增产率最高可达72%。加拿大Manitoba西部[8]，贫磷土壤苜蓿施磷肥增产率可达47%。加拿大Alberta南部[9]，土壤有机质含量45 g·kg^{-1}时苜蓿施氮肥增产率达5%~13%，而土壤有机质含量103 g·kg^{-1}时苜蓿施氮肥反而减产。李玉山[1]在黄土高原半湿润地区的研究表明，苜蓿施用磷肥可增产3.8%，化肥与有机肥配施可增产17.3%。潘玲等[10]研究表明，长江北岸亚热带湿润气候区，苜蓿施氮磷钾肥增产率最高可达3.7%，但过量施肥会导致苜蓿减产。赵云等[11]研究表明，半干旱区苜蓿施氮磷钾肥增产率最高达58%。不同气候条件及人类活动对植被影响强烈[12]，这些在特定的气候和土壤条件下得出的结论表明，气候和土壤养分等环境条件不同，其对苜蓿产量的影响也不尽相同。

以往各研究区域的研究结果并不一致[7-11]，为探求研究结果迥异的原因，明晰施肥措施对苜蓿产量影响的区域性特征，降雨量和土壤性质是否会影响施肥的效果，本研究采用定量综合评价研究结果的Meta分析法[13-14]，基于全国尺度苜蓿产量的数

收稿日期： 2020-03-07；　**修订日期：** 2020-12-24
基金项目： 国家自然科学基金项目（31860364，41461067）；甘肃省科技计划项目（18JR3RA175，20JR5RA019）；甘肃农业大学学科建设基金项目（GAU-XKJS-2018-195）
作者简介： 才璐（1996-），女，在读博士生，主要从事土壤生态研究. E-mail: cailu19960517@163.com
通讯作者： 罗珠珠（1979-），女，教授，主要从事农业生态研究. E-mail: luozz@gsau.edu.cn

据，以不施肥为对照组，以施肥为处理组，定量分析不同生境条件下苜蓿产量对施肥的响应，以期为人工苜蓿草地的合理利用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　数据来源和分类

基于中国知网、SpringLink、谷歌学术和万方4个文献数据库，设置"苜蓿"、"施肥"和"产量"为主要关键词进行检索，整理截止2019年4月30日前所公开发表的我国施肥苜蓿田间试验文献。为减少Meta分析结果发生偏倚，设置以下标准进一步剔除不合格文献：(1) 文中提供试验地的经纬度或详细位置；(2) 试验包含配对的数据组，其中对照组为不施肥苜蓿试验数据，处理组为苜蓿施肥试验数据；(3) 试验数据测量方法一致且以数字或图表形式报道。最终收录78篇文献，利用Excel软件建立相关数据库。所涉及的施肥类型分类如下：氮肥(N)、磷肥(P)、钾肥(K)、有机肥(M)、氮磷肥配施(NP)、磷钾肥配施(PK)、氮钾肥配施(NK)、氮磷钾肥配施(NPK)和化肥与有机肥配施(F+M)。在此基础上又进行如下分组：以干湿区划分为依据，分为干旱区(降雨量<200 mm)、半干旱区(降雨量200~400 mm)、半湿润区(降雨量400~800 mm)和湿润区(降雨量>800 mm)；以《中国土壤分类系统(1992)》中对土壤亚类的划分标准为依据，分为栗钙土、黑垆土、黄绵土、盐化潮土和砂姜黑土。最终收集到苜蓿产量数据1031对(表1)。所有纳入Meta分析数据库的文献试验地共64个(表2)。

1.2　数据分析

1.2.1　标准差计算　Meta分析中计算各研究权重时使用标准差(SD)，但若文献中没有列出标准差且无法计算时，则使用集中数据计算平均变异系数(CV)，再用CV计算缺失的SD[14]，计算公式为：

$$SD = CV \times X \tag{1}$$

式中：X 为缺失SD的数据值。

1.2.2　效应量计算　本文用效应值ln$R$度量处理措施对响应指标的影响，计算公式如下[15-17]：

$$R = \frac{Xe}{Xc} \tag{2}$$

$$\ln R = \ln\left(\frac{Xe}{Xc}\right) = \ln Xe - \ln Xc \tag{3}$$

式中：R 为效应比；Xc为不施肥苜蓿产量的平均值；Xe为施肥苜蓿产量的平均值。对应指标效应值(ln$R$)的方差(V)计算公式为[15-17]：

$$V = \frac{Se^2}{NeXe^2} + \frac{Sc^2}{NcXc^2} \tag{4}$$

式中：Sc为不施肥苜蓿产量的标准差；Se为施肥苜蓿产量的标准差；Nc为不施肥苜蓿产量数据的样本量；Ne为施肥苜蓿产量数据的样本量。

处理组综合效应值($\ln\bar{R}$)由不同数据对的权重加和得到，计算公式如下[15-16]：

$$\ln\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^{k} w_i \ln R_i}{\sum_{i=1}^{k} w_i} \tag{5}$$

$$w_i = \frac{1}{v_i} \tag{6}$$

式中：$\ln\bar{R}$ 为平均效应大小；w_i 为 i 的权重，即样本方差 v_i 的倒数；$\ln R_i$ 为 i 的对数响应比；k 为统计研究的数量。用百分比表示的变化率(Y)可更加直观的描述结果，计算公式为[15]：

$$Y = (R-1) \times 100\% \tag{7}$$

以横坐标零点为界，若95%置信区间跨过零点，则认为与对照相比，处理措施无显著差异，反之则具有显著差异[18]。若不同类别的95%置信区间重叠，则认为不同类别变量间不存在显著差异[19]。

进行Meta分析时检验样本数据是否存在异质性，需进行异质性检验(Q检验)，当P>0.05(卡方分布检验)，表明数据不存在异质性，选用固定效应模型(Fixed effect model)；反之，则表明数据有异质性，应采用随机效应模型(Random effect model)。

1.3　数据处理

本研究用WebPlotDigitizer[20]软件提取涉及的文

表1　数据分组及样本数分布

Tab. 1　Data grouping and sample numbers for the meta-analysis

组别	降雨量				土壤类型				
	湿润区	半湿润区	半干旱区	干旱区	栗钙土	黑垆土	黄绵土	盐化潮土	砂姜黑土
样本数	168	806	1306	441	575	61	393	129	90

表2 Meta分析收录文献的试验地点及施肥种类

Tab. 2 Locations of field experiments and kinds of fertilization in the literatures included in this meta-analysis

序号	试验地点	施肥种类	序号	试验地点	施肥种类
1	北京劳沃草业技术开发中心顺义加工基地	NP、NK、PK、NPK	33	内蒙古土默特左旗沟子板蒙草拉旱苜蓿试验基地	NP、NK、PK、NPK
2	甘肃农垦集团生地湾农场	N;NP、NK、PK、NPK	34	宁夏大学宁夏农垦农科教学合作人才培养基地	N、P、NP
3	甘肃农业大学兰州牧草试验站	P、M、F+M	35	宁夏固原市农业科学研究所头营试验基地	NP、NK、NPK
4	甘肃省定西市安定区凤翔镇丰禾村	N、NP	36	宁夏固原市原州区黄铎堡镇曹堡村	NP、NK、PK、NPK
5	甘肃省定西市李家堡镇麻子川村	N、NP、NK、PK、NPK;P、F+M	37	宁夏回族自治区吴忠市红寺堡区	NPK
6	甘肃省国营八一农场	NP、NK、PK、NPK	38	宁夏农垦局贺兰山茂盛草业有限公司核心试验站	N
7	甘肃省兰州大学黄土高原半干旱生态系统定位研究站	N、P、NP	39	宁夏中部干旱带盐池县四墩子农牧科技研究所基地	P、K、PK
8	甘肃省兰州大学庆阳黄土高原草地农业试验站	N	40	青海省大通县长宁乡王家庄村	N、P、K
9	甘肃省兰州市安宁区甘肃农业大学校园内	N、P、NP;N	41	山东省滨州市无棣县种畜场	P
10	甘肃省兰州市永登县中川镇何家梁村	P、NP	42	山东省农业科学院农营牧草科技示范基地内	NPK
11	甘肃省临夏县尹集镇	N、P、K、NP、NK、PK、NPK	43	山东省青岛农业大学胶州高新科技示范园	N、P、K、NP、NK、PK、NPK
12	甘肃省张掖市民乐县	M、F+M	44	山西省农业科学院农业环境与资源研究所盐碱地改良试验示范基地	NPK
13	贵州省贵阳市花溪区	P、K、PK	45	山西省山阴县试验地	M
14	贵州省威宁县雪山镇雪山村	N、P、K、NP、NK、PK、NPK	46	山西省太原市	N、NP、NPK
15	河北农业大学标本院内	N、F+M	47	陕西省西北农林科技大学农作一站	N、P、K、NP、NK、PK、NPK
16	河北省沧州地区南皮县乌马营镇徐郎中村	P	48	陕西省榆林市神木县六道沟小流域	N、P、NP
17	河北省沧州市农林科学院	P、K、PK	49	陕西省长武县十里铺村旱塬	P、F+M
18	河北省沧州市农林科学院前营试验站	NP、NK、PK、NPK	50	四川省西昌市交凉山州畜牧所牧草地	PK
19	河南农业大学科教园区	NPK、F+M	51	四川省西昌市小庙乡	P、K、PK
20	黑龙江省哈尔滨市双城区五家镇	NPK	52	西藏农牧科学院畜牧兽医研究所	PK
21	吉林省松原市长岭县三十号乡	M、NPK	53	新疆北疆浅埋式滴灌苜蓿高效节水示范区	N、NP
22	吉林省长春市吉林农业大学实验区	NP、NK、PK、NPK	54	新疆呼图壁县农业部旱生牧草种子基地	NP、NK、PK、NPK
23	内蒙古赤峰综合实验站牧草实验示范基地	N、P、K、NP、NK、PK、NPK	55	新疆库尔勒地区大华公司中心农场草料种植基地	N、P、K、NP、NK、PK、NPK
24	内蒙古鄂尔多斯毛乌素沙地	N、NPK;N	56	新疆奎屯农124团和131团	N、P、PK、NPK
25	内蒙古鄂尔多斯市鄂托克前旗	NP、NK、PK、NPK	57	新疆农业大学三坪农场牧草与草坪试验站	PK、NPK;NP、NK、PK、NPK
26	内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗十二连城乡东不拉村	NP、NK、PK、NPK	58	新疆石河子大学实验站牧草试验田	P
27	内蒙古海拉尔市谢尔塔拉镇呼伦贝尔国家野外站	N	59	新疆石河子垦区的142团	N、P、K、NP、NK、PK、NPK
28	内蒙古呼和浩特市和林格尔县盛乐园区	NP、NK、PK、NPK	60	新疆石河子农业示范园区试验田	P
29	内蒙古呼和浩特市土默特左旗沙尔沁乡	NP、NK、PK、NPK	61	新疆天山畜牧昌吉生物工程有限责任公司榆树沟基地	N、P、K
30	内蒙古科尔沁沙地实验区林西县	M	62	中国科学院植物研究所多伦恢复生态学试验站试验示范基地	N、P
31	内蒙古民族大学试验农场	P	63	中国农业科学院兰州畜牧研究所实验基地	NP、NK、PK、NPK
32	内蒙古农业大学海流图现代农牧业科技园区	NPK	64	中国农业科学院廊坊实验基地	P

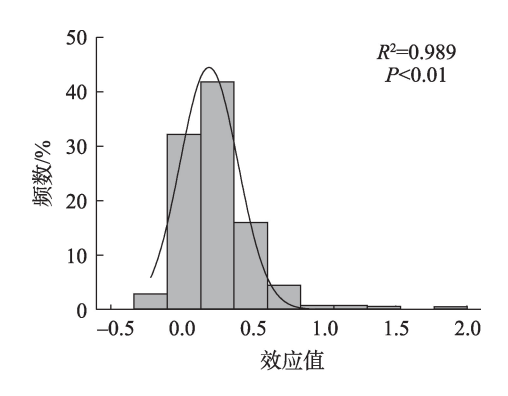
注:施肥类型包括氮肥(N)、磷肥(P)、钾肥(K)、有机肥(M)、氮磷肥配施(NP)、磷钾肥配施(PK)、氮钾肥配施(NK)、氮磷钾肥配施(NPK)和化肥与有机肥配施(F+M)。

献中以图表示的数据，并利用Excel 2013建立Meta分析数据库，通过MetaWin 2.0对数据进行统计分析，使用SPSS 23.0对所收集文献中的土壤基础养分含量进行方差分析，并用SigmaPlot 12.5制图。

2　结果与分析

2.1　偏倚检验

如图1所示，本研究对所收集的产量数据对进行偏倚检验，将产量的效应值频率分布拟合为高斯函数，经K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验，不同施肥条件下苜蓿产量效应值频率分布不服从正态分布($P<0.01$)。因此，本文使用非参数估计方法(Bootstrapping)生成的综合效应值($\ln\bar{R}$)和95%置信区间进行数据分析[18]。



注：实线拟合为高斯分布函数。

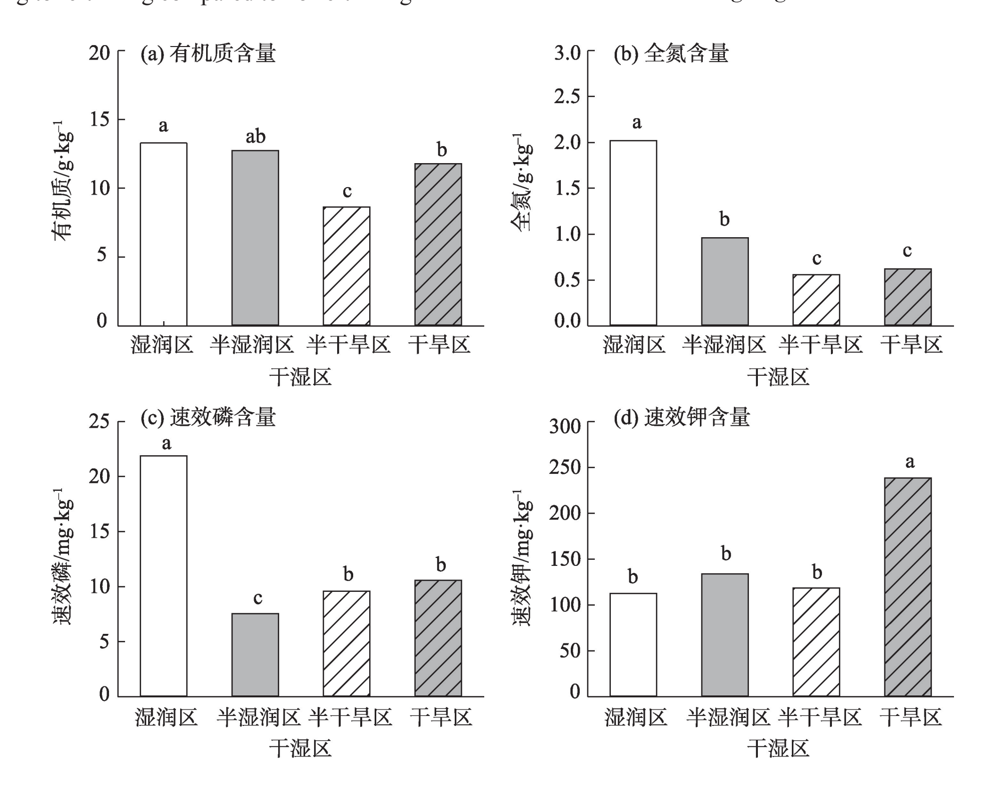
图1　苜蓿产量效应值对施肥响应的频数分布图

Fig. 1　Frequency distribution of effect size for alfalfa yield responding to fertilizing compared to no-fertilizing

2.2　土壤基础养分情况

图2所示为本研究所收集文献中不同降雨类型区土壤基础养分状况。不同降雨条件下土壤有机质含量平均值为8.6~13.3 g·kg^{-1}(图2a)；全氮含量平均值为0.6~2.0 g·kg^{-1}(图2b)；速效磷含量平均值为7.6~21.9 mg·kg^{-1}(图2c)；速效钾含量平均值为112.7~238.3 mg·kg^{-1}(图2d)。统计分析表明，湿润区和半湿润区土壤有机质含量显著高于半干旱区($P<0.05$)；湿润区和半湿润区全氮含量显著高于干旱区和半干旱区($P<0.05$)，且半干旱区和干旱区无显著差异；湿润区速效磷含量显著高于其它降雨类型区($P<0.05$)，半干旱区和干旱区无明显差异；速效钾含量则表现为干旱区显著高于其它降雨类型区($P<0.05$)。

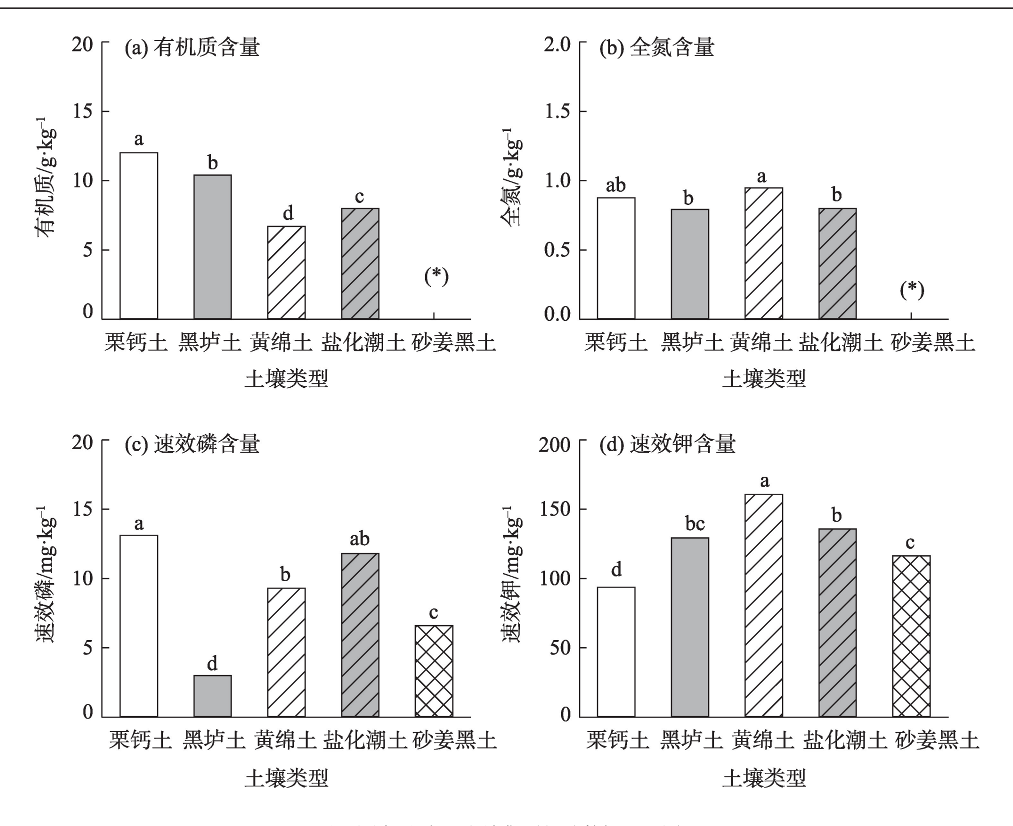
图3所示为本研究所收集文献中不同土壤类型基础养分状况。不同土壤类型土壤有机质含量平均值为8.0~12.0 g·kg^{-1}(图3a)；全氮含量平均值为



注：不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)。下同。

图2　不同降雨条件下的土壤基础养分

Fig. 2　Soil nutrient background under different rainfall conditions



注:(*)标注表示未搜集到相关数据。下同。

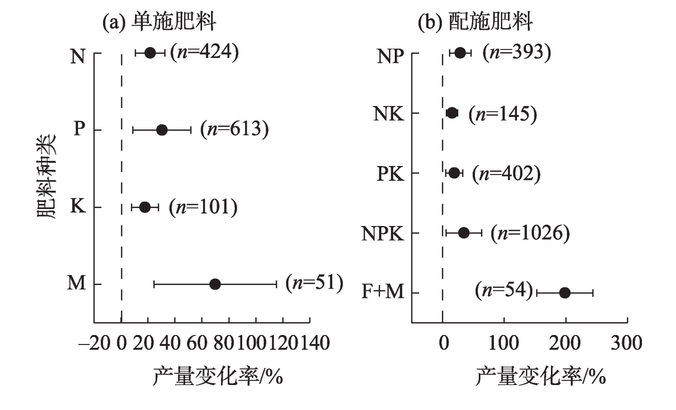
图3　不同土壤类型下的土壤基础养分

Fig. 3　Soil nutrient background under different soil types

0.8~1.0 g·kg⁻¹(图3b);速效磷含量平均值为3.0~13.0 mg·kg⁻¹(图3c);速效钾含量平均值为93.7~160.7 mg·kg⁻¹(图3d)。统计分析发现,栗钙土有机质含量显著高于其它土壤类型区(P<0.05);黄绵土全氮含量显著高于黑垆土和盐化潮土(P<0.05);栗钙土速效磷含量显著高于其它土壤类型区(P<0.05);黄绵土速效钾含量显著高于其它土壤类型区(P<0.05),栗钙土速效钾含量显著低于其它土壤类型区(P<0.05)。

2.3　苜蓿产量对肥料种类的响应

与不施肥苜蓿(对照)相比,施肥均可显著增加苜蓿产量(P<0.05)。单施有机肥(图4a)处理增产率最高,达69.9%;N肥、P肥和K肥的增产率分别为21.8%、30.4%和17.9%。配施肥料处理(图4b)以F+M肥的增产率最高为198.2%;NP肥、PK肥、NK肥和NPK肥的增产率分别为28.5%、19.1%、15.4%和34.6%。



注:图中n表示样本量;施肥类型包括氮肥(N)、磷肥(P)、钾肥(K)、有机肥(M)、氮磷肥配施(NP)、磷钾肥配施(PK)、氮钾肥配施(NK)、氮磷钾肥配施(NPK)和化肥与有机肥配施(F+M)。下同。

图4　苜蓿产量对单施肥料和配施肥料的响应

Fig. 4　Response of change in alfalfa yield to single fertilizer and fertilizer combination

2.4　施肥条件下苜蓿产量的影响因素分析

2.4.1　年降雨量　与对照相比,湿润区(图5a),单施P肥和K肥的增产效应显著(P<0.05),增产率分别为16.9%和2.7%;半湿润区(图5b),施肥苜蓿产量均显著增加(P<0.05),N肥、P肥、K肥和有机肥增产率分别为28.7%、19.0%、5.6%和70.1%;半干旱区(图5c),施肥的增产效应均十分显著(P<0.05),单施有机肥增产效应最高,增产率为38.5%,N肥、P肥和K肥增产率分别为6.6%、37.0%和17.4%;干旱区(图5d),N肥无明显增产效应,其余处理增产效应显著(P<0.05),P肥和K肥的增产率分别为39.2%和49.8%。

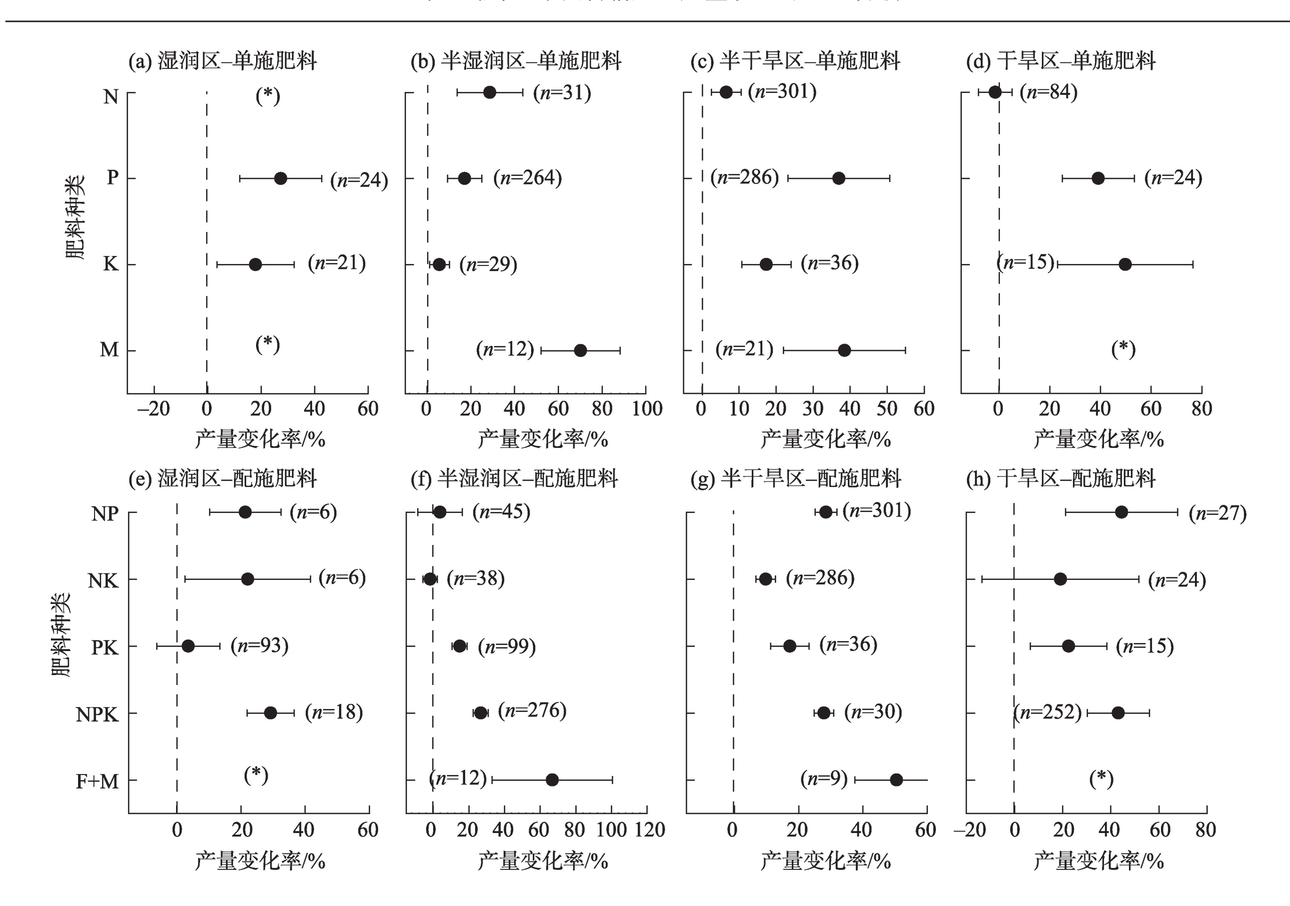


图5　不同肥料种类下苜蓿产量对降雨量的响应

Fig. 5　Response of change in alfalfa yield to rainfall under different fertilizer types

与不施肥相比，湿润区（图5e），PK肥虽增产但效应不显著，NP肥、NK肥和NPK肥增产效应显著（P<0.05），增产率分别为21.3%、22.1%和29.2%；半湿润区（图5f），NP肥虽增产但效应不显著，NK肥没有增产效应，其它处理具有显著增产效应（P<0.05），PK肥、NPK肥和F+M肥增产率依次为14.9%、25.2%和66.8%；半干旱区（图5g），施肥苜蓿的产量均显著增加（P<0.05），NP肥、NK肥、PK肥、NPK肥和F+M肥的增产率分别为28.0%、9.7%、17.3%、27.9%和50.5%；干旱区（图5h），NK肥虽增产但效应并不显著，其它施肥措施具有显著增产效益（P<0.05），NP肥、PK肥和NPK肥增产率依次为44.5%、22.5%和43.2%。

2.4.2　土壤类型　与对照相比，栗钙土（图6a）单施N肥、P肥、K肥和有机肥的增产效应显著（P<0.05），增产率分别为5.5%、17.3%、16.8%和37.2%；黑垆土（图6b）单施P肥显著提高苜蓿产量（P<0.05），增产率为183.0%；单施N肥并无增产效应；黄绵土单施N、P的增产效应均显著（P<0.05），增产率分别为24.1%和31.0%（图6c）；盐化潮土（图6d）单施P肥的增产率为15.2%（P<0.05）；砂姜黑土（图6e）单施P肥和单施K肥的增产效应均不显著。

与对照相比，栗钙土（图6f）NP肥、NK肥、PK肥和NPK肥的增产效应均非常显著（P<0.05），增产率分别为24.2%、11.9%、20.3%和27.2%；黑垆土（图6g）施肥苜蓿产量均显著增加（P<0.05），NPK肥和F+M肥增产率分别为16.3%和101.9%；黄绵土NK肥和PK肥的增产效应并不显著，NP肥、NPK肥和F+M肥的增产率依次为18.4%、38.9%和50.5%（图6h）；盐化潮土（图6i）NK肥配施的增产效应不显著，NP肥、PK肥和NPK肥的增产率分别为50.9%、50.8%和49.6%；砂姜黑土（图6j）各施肥处理均无增产效应。

3　讨　论

3.1　苜蓿产量对施肥的响应

施肥是提高作物产量、改善作物品质的重要人工调控措施。本研究整合分析表明，施肥可以显著提高苜蓿产量，其中尤以有机肥和磷肥单施的增产效应明显。因为有机肥与化肥相比，养分全面，肥效持久，其中富含大量的有机胶体易形成良好的土

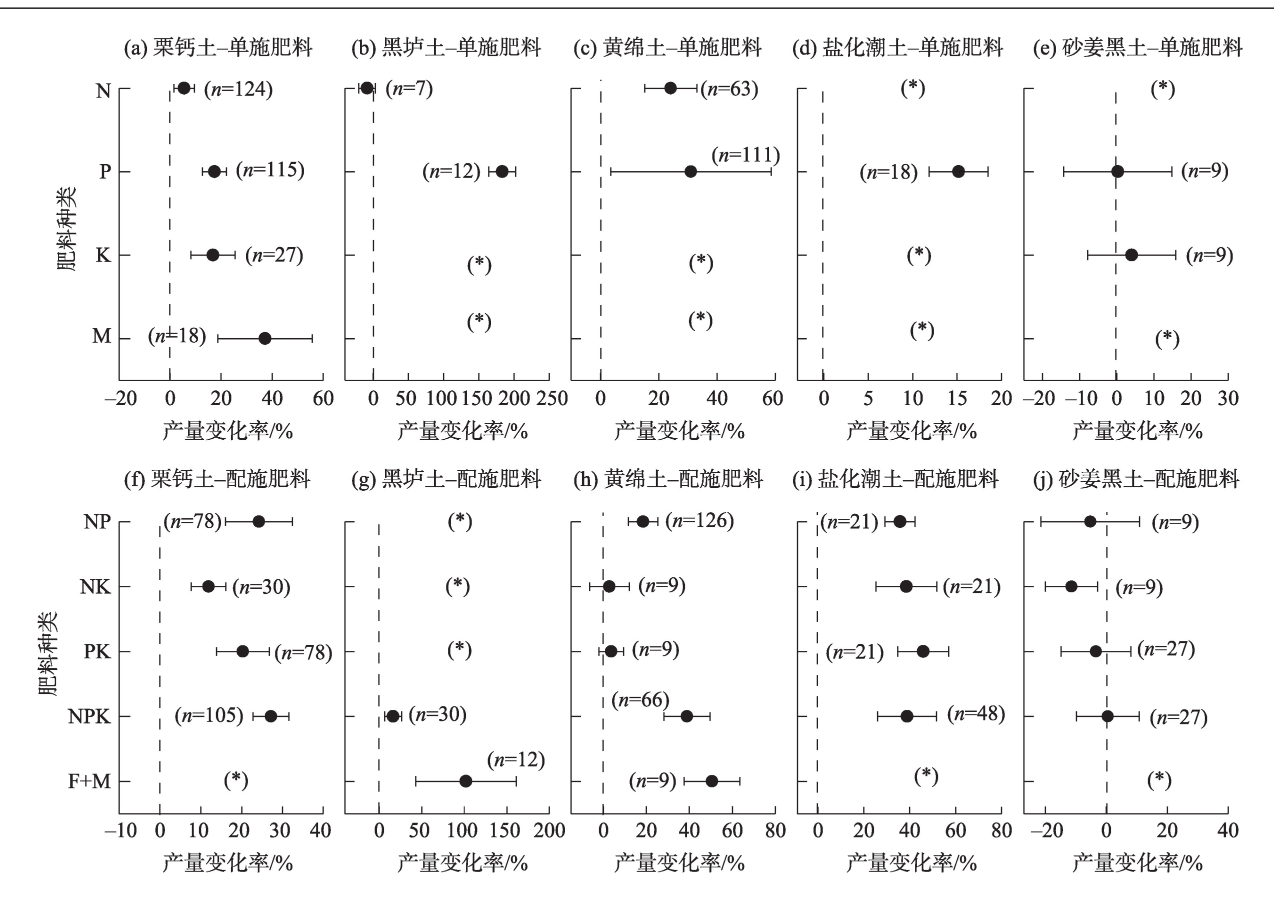


图6 不同肥料种类下苜蓿产量对土壤类型的响应

Fig. 6 Response of change in alfalfa yield to soil types under different fertilizer types

壤结构，改善土壤肥力状况[21]。磷肥的增产效应在化肥中表现最佳，因为苜蓿作为一种优质高蛋白的饲草作物，同时也是增碳固氮的绿肥作物，但其生长过程中对土壤磷素耗竭强烈[22-23]，因而土壤磷素有效性对苜蓿的生长至关重要，增施磷肥表现出了较高的增产效应。本研究同时发现，化肥配施有机肥的增产效应优于单施，且不同施肥条件下苜蓿增产效应也有较大差异，其原因可归因于不同肥料种类对作物生长作用的不同。苜蓿施氮肥增产是通过影响苜蓿的叶片和根系的生长，改变光合作用和水分利用效率[24-25]。而磷肥和钾肥可促进苜蓿的固氮水平[26-28]，从而影响植株生长以提高产量。施有机肥可为苜蓿提供丰富的营养元素，还可改善土壤理化性质和生物活性[28]，因此，有机肥与化肥配施可以促进不同营养元素之间的交互效应，促进苜蓿产量提升。

3.2 不同生境下苜蓿产量对施肥措施的响应分析

苜蓿具有优良的耐旱性和水土保持性，但其对水分需求量大，苜蓿生长前期依靠自然降水和深层土壤贮水双重供给，尤其是在干旱半干旱地区天然降水是非灌溉条件下土壤水分补给的主要来源[29]，但随着种植时间的延长，深层土壤水分过耗强烈，土壤干层逐渐形成并不断加厚，深层土壤水分供给量逐渐减少以至最终消失，此后苜蓿生长主要依靠当年降水供给。因此，降雨量是影响水肥耦合效果的主要因素，从而影响肥料的增产效应。此外连续种植多年后的苜蓿对降水量变化的响应会更加强烈，土壤水分影响着作物生长[30]，有研究表明会降低苜蓿的固氮作用[31-32]，对本研究搜集到的土壤基础养分分析发现，干旱半干旱区全氮含量显著低于湿润和半湿润区，但值得注意的是，本研究整合分析却发现氮肥的增产效应随降雨量的降低而大幅下降，磷钾肥的增产效应则刚好相反，这可能归因于磷钾有利于改善干旱半干旱条件下根瘤菌数量和活性不足，促进根瘤菌的固氮水平。因此，与湿润和半湿润区相比，干旱和半干旱区单施磷肥、钾肥及化肥配施的增产效应更为明显。本研究发现，与半干旱区相比，半湿润区单施有机肥和化肥配施有机肥的增产效果大幅提升。对土壤基础养分分析发现，半干旱区有机质含量显著低于半湿润区，

此外降雨会增加土壤微生物数量与活性，从而加快土壤呼吸速率即土壤有机质的分解[33]；土壤水分是影响呼吸速率的重要因素[34]，半干旱区降雨量较少导致土壤水分含量较低，减少了微生物对有机质的转化，抑制了有机肥肥效[35]，因此在半湿润区有机肥增产效果更好。

不同土壤类型由于土壤基础理化性状有别，土壤特性影响着旱季土壤水分时空变异分布[36]，强烈影响苜蓿施肥效果。栗钙土单施有机肥的增产率明显高于单施化肥和化肥配施，栗钙土土壤有机质含量约为20~37 g·kg^{-1}[37]，本研究所搜集文献中，由于不合理农业措施导致栗钙土区域基础有机质含量低于该水平，因此增施有机肥补充有机质，还可改善土壤结构，增强土壤团聚水平，提高土壤水肥作用[38]。黑垆土单施磷肥的增产效果最佳，主要原因在于黑垆土养分含量低，尤其有效磷明显不足[21]，因此施磷肥增产效果明显。黄绵土属于贫磷富钾且有机质含量低的旱作土壤，其透水性差，保肥能力低[21]，而有机肥的施用提高了团粒结构，改善了黄绵土的土壤结构，提升了土壤抗蚀性，增产效果显著。盐化潮土化肥配施增产效应明显，这是由于盐化潮土是土壤养分含量低的中低产田，化肥配施可快速补充土壤大量速效养分，因而可有效提高苜蓿产量。本研究中磷钾配施的增产率高于氮磷肥、氮钾肥及氮磷钾肥配施，表明苜蓿由于自身可以固氮作用，增施氮肥并无明显的增产作用。砂姜黑土是一种脱沼泽化和旱耕熟化后发育的质地黏重的半水成土[21]，表现为有机质含量不足，兼具缺磷少氮钾丰富的特点[39-40]，对土壤基础养分分析中也发现砂姜黑土贫磷。前人有研究表明[41]，施用有机物料对砂姜黑土的培肥效果优于单纯的化肥施用。本研究结果表明砂浆黑土上施用化肥对苜蓿无明显增产效应。因此，砂姜黑土应因地制宜，建议增施有机肥或有机无机配施以期改善土壤质地过黏、结构不良的特性，以促进作物生产。

4　结　论

（1）施肥可以显著提高苜蓿产量，其中尤以有机肥和磷肥单施的增产效应明显，且化肥与有机肥配施的增产效应优于单施。

（2）降雨量>800 mm的湿润区氮磷钾配施增产效应较高；降雨量400~800 mm的半湿润区单施有机肥和化肥配施有机肥均表现出良好的增产效应；降雨量200~400 mm的半干旱区化肥配施有机肥的增产效应最高，磷肥单施和有机肥单施也表现出较好的增产效应；降雨量<200 mm的干旱区，氮肥单施无增产效应，但磷、钾肥单施和氮磷肥配施增产效应明显。

（3）栗钙土施用有机肥增产效应最佳；黑垆土单施磷肥的增产率最高；黄绵土有机肥配施化肥增产效应最高；盐化潮土磷钾配施的增产效果最优；砂姜黑土施肥并无明显增产效应。

参考文献（References）

[1] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 404−411. [Li Yushan. Productivity dynamic of alfalfa and its effects on water eco-environment[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(3): 404−411.]

[2] 韩清芳, 周芳, 贾珺, 等. 施肥对不同品种苜蓿生产力及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1413−1418. [Han Qingfang, Zhou Fang, Jia Jun, et al. Effect of fertilization on productivity different producing performance alfalfa varieties and soil fertility[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1413−1418.]

[3] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1445−1451. [Zang Yifei, Hao Mingde, Zhang Liqiong, et al. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1445−1451.]

[4] 樊军, 郝明德, 王永功. 旱地长期轮作施肥对土壤肥力影响的定位研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 31−36. [Fan Jun, Hao Mingde, Wang Yonggong. Effects of rotations and fertilizations on soil fertility on upland of Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(1): 31−36.]

[5] 魏志标, 柏兆海, 马林, 等. 中国苜蓿、黑麦草和燕麦草产量差及影响因素[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 507−522. [Wei Zhibiao, Bai Zhaohai, Ma Lin, et al. Yield gap of alfalfa, ryegrass and oat grass and their influence factors in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(3): 507−522.]

[6] 李新乐, 穆怀彬, 侯向阳, 等. 水、磷对紫花苜蓿产量及水肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1161−1167. [Li Xinle, Mu Huaibin, Hou Xiangyang, et al. Effects of irrigation and phosphorus fertilization on alfalfa yield and water and fertilizer use efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5): 1161−1167.]

[7] Berg W K, Cunningham S M, Brouder S M, et al. Influence of phos-

phorus and potassium on alfalfa yield and yield components[J]. Crop Science, 2005, 45(1): 297–304.

[8] Simons R G, Grant C A, Bailey L D. Effect of fertilizer placement on yield of established alfalfa stands[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1995, 75(4): 883–887.

[9] Malhi S S, Zentner R P, Heier K. Effectiveness of alfalfa in reducing fertilizer N input for optimum forage yield, protein concentration, returns and energy performance of bromegrass-alfalfa mixtures[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 62(3): 219–227.

[10] 潘玲, 魏臻武, 武自念, 等. 施肥和播种量对扬州地区苜蓿生长特性和产草量的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(6): 1099–1104. [Pan Ling, Wei Zhenwu, Wu Zinian, et al. Effects of fertilizers and sowing rates on growth characteristics and forage yields of alfalfa in Yangzhou region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(6): 1099–1104.]

[11] 赵云, 谢开云, 杨秀芳, 等. 氮磷钾配比施肥对敖汉苜蓿产量和品质的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(5): 723–727. [Zhao Yun, Xie Kaiyun, Yang Xiufang, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium ratio fertilizer on the the yield and quality of Aohan alfafa[J]. Pratacultural Science, 2013, 30(5): 723–727.]

[12] 秦景秀, 郝兴明, 张颖, 等. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 117–125. [Qin Jingxiu, Hao Xingming, Zhang Ying, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation productivity in arid areas[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 117–125.]

[13] Han Z, Walter M D, Drinkwater L E. N_2O emissions from grain cropping systems: A meta-analysis of the impacts of fertilizer-based and ecologically-based nutrient management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2017, 107(3): 335–355.

[14] Yu Y Y, Neil C T, Gong Y H, et al. Benefits and limitations to straw- and plastic-film mulch on maize yield and water use efficiency: A meta-analysis across hydrothermal gradients[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 99: 138–147.

[15] Wang L L, Li Q, Coulter J A, et al. Winter wheat yield and water use efficiency response to organic fertilization in northern China: A meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2020, 229(2): 1–15.

[16] 才璐, 王林林, 罗珠珠, 等. 中国苜蓿产量及水分利用效率对种植年限响应的Meta分析[J]. 草业学报, 2020, 29(6): 27–38. [Cai Lu, Wang Linlin, Luo Zhuzhu, et al. Meta-analysis of alfalfa yield and WUE response to growing ages in China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(6): 27–38.]

[17] Nils B, Michael S, Maria L C, et al. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N_2O emissions: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 2354–2364.

[18] Wang L L, Coulter J A, Palta J A, et al. Mulching-induced changes in tuber yield and nitrogen use efficiency in potato in China: A meta-analysis[J]. Agronomy, 2019, 9(12): 793–808.

[19] Daniel G, Kate M S. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms: A review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 75: 54–63.

[20] Burda B U, O' Connor E A, Webber E M, et at. Estimating data from figures with a web-based program: Considerations for a systematic review[J]. Research Synthesis Methods, 2017, 8(3): 258–262.

[21] 谢德体, 蒋先军, 王昌全. 土壤肥料学[M]. 第2版. 北京: 中国林业出版社, 2015. [Xie Deti, Jiang Xianjun, Wang Changquan. Soil fertilizer[M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Press, 2015.]

[22] 杨恒山, 曹敏建, 范富, 等. 紫花苜蓿生长年限对土壤理化性状的影响[J]. 中国草地学报, 2006, 28(6): 29–32. [Yang Hengshan, Cao Minjian, Fan Fu, et al. Effects of the number of growth years of alfalfa on the physical and chemical properties of soil[J]. Chinese Journal of Grassland, 2006, 28(6): 29–32.]

[23] 韩清芳, 周芳, 贾珺, 等. 施肥对不同品种苜蓿生产力及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1413–1418. [Han Qingfang, Zhou Fang, Jia Jun, et al. Effect of fertilization on productivity different producing performance alfalfa varieties and soil fertility[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1413–1418.]

[24] 李丽, 李宁, 盛建东, 等. 施氮量和种植密度对紫花苜蓿生长及种子产量的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(1): 54–57. [Li Li, Li Ning, Sheng Jiandong, et al. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on alfalfa growth and seed yield[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(1): 54–57.]

[25] 王丹, 何峰, 谢开云, 等. 施氮对紫花苜蓿生长和土壤氮含量的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(10): 1569–1574. [Wang Dan, He Feng, Xie Kaiyun, et al. Effects of nitrogen application on alfalfa plant growth and soil nitrogen content[J]. Pratacultural Science, 2013, 30(10): 1569–1574.]

[26] 齐敏兴, 刘晓静, 张晓磊, 等. 不同磷水平对紫花苜蓿光合作用和根瘤固氮特性的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(3): 512–516. [Qi Minxing, Liu Xiaojing, Zhang Xiaolei, et al. Effects of different phosphorus levels on photosynthesis and root nodule nitrogen fixing characteristic of alfalfa[J]. Acta Agrestia Sinica, 2013, 21(3): 512–516.]

[27] 侯湃, 刘自学, 刘艺杉, 等. 北京平原区紫花苜蓿施肥组合试验[J]. 草业科学, 2014, 31(1): 144–149. [Hou Pai, Liu Zixue, Liu Yishan, et al. Screening of fertilization combination for alfalfa in Beijing area[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(1): 144–149.]

[28] 胡诚, 曹志平, 罗艳蕊, 等. 长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 48–51. [Hu Cheng, Cao Zhiping, Luo Yanrui, et al. Effect of long-term application of microorganismic compost or vermicompost on soil fertility and microbial biomasscarbon[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(3): 48–51.]

[29] 邹慧, 高光耀, 朱斌, 等. 黄土高原恢复草地土壤水分对降水响

应及模拟[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 890−898. [Zou Hui, Gao Guangyao, Zhu Bin, et al. Modeling of the response of soil moisture to precipitation in the restored grasslands of the Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 890−898.]

[30] Jafari Z, Matinkhah S H, Mosaddeghi M R, et al. Evaluation of the efficiency of irrigation methods on the growth and survival of tree seedlings in an arid climate[J]. Journal of Arid Land, 2020, 12(3): 495−507.

[31] Li Y S, Huang M B. Pasture yield and soil water depletion of continuous growing alfalfa in the Loess Plateau of China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2008, 124(1): 24−32.

[32] 曾昭海, 胡跃高, 陈文新, 等. 共生固氮在农牧业上的作用及影响因素研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 21−24. [Zeng Zhaohai, Hu Yaogao, Chen Wenxin, et al. Review on studies on the important role of symbiotic nitrogen fixation in agriculture and livestock production and the factors affecting its efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4): 21−24.]

[33] 贾丙瑞, 周广胜, 王风玉, 等. 土壤微生物与根系呼吸作用影响因子分析[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1547−1552. [Jia Bingrui, Zhou Guangsheng, Wang Fengyu, et al. Affecting factors of soil microorganism and root respiration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(8): 1547−1552.]

[34] 李典鹏, 姚美思, 孙涛, 等. 干旱区盐湖沿岸土壤呼吸特征及其影响因素[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 761−769. [Li Dianpeng, Yao Meisi, Sun Tao, et al. Characteristic of soil respiration and its influencing factors on the coastal of saline lake in arid region[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 761−769.]

[35] 王义东, 王辉民, 马泽清, 等. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(5): 601−610. [Wang Yidong, Wang Huimin, Ma Zeqing, et al. Review of response mechanism of soil respiration to rainfall[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(5): 601−610.]

[36] 韩姣姣, 段旭, 赵洋毅. 金沙江干热河谷不同植被坡面土壤水分时空分布特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 121−129. [Han Jiaojiao, Duan Xu, Zhao Yangyi. Spatial and temporal variability of soil moisture on slope land of different vegetation of dry-hot valley in Jinsha River[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 121−129.]

[37] 郑然, 郑宝林. 冀北栗钙土区耕层土壤有机质和全氮的空间变异特征[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(5): 123−129. [Zheng Ran, Zheng Baolin. Spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in chestnut soil region of northern Hebei[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(5): 123−129.]

[38] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 175−181. [Ning Chuanchuan, Wang Jianwu, Cai Kunzheng. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 175−181.]

[39] 孙怀文. 砂姜黑土的水分特性及其与土壤易旱的关系[J]. 土壤学报, 1993, 30(4): 423−431. [Sun Huaiwen. Moisture characters of calcic concretion black soil and their relationship with soil drought [J]. Acta Pedologica Sinica, 1993, 30(4): 423−431.]

[40] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4781−4789. [Wang Daozhong, Hua Keke, Guo Zhibin. Effects of long-term fertilization on crop yield and soil physical properties in lime concretion black soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4781−4789.]

[41] 李玮, 孔令聪, 张存岭, 等. 长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 943−949. [Li Wei, Kong Lingcong, Zhang Cunling, et al. Effect of long-term fertilization on carbon sequestration in lime concretion black soil relative to fertilization pattern[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 943−949.]

Meta-analysis of yield effects of fertilization on alfalfa in China

CAI Lu[1], WANG Linlin[2], LUO Zhuzhu[1,2], LI Lingling[2],
NIU Yining[2], CAI Liqun[1,2], XIE Junhong[2]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Gansu Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: This paper aims to explore optimal alfalfa fertilizer application in different environments. To this end, a meta-analysis was conducted to determine how fertilization practices affect the yield of alfalfa (*Medicago sativa*) and how this is impacted by fertilization management and the growth environment. A search of peer-reviewed publications was performed to collect data on the effects of fertilization on the yield of alfalfa grown in China. Specifically, field studies with and without fertilization treatment and with data on forage yield were obtained. A total of 78 publications containing 1031 observations from 61 sites were compiled into a dataset. The articles were selected from a corpus of studies published at home and abroad before May 2019. Key data, fertilizer types, annual precipitation, and soil types were abstracted from the selected articles, and the quantitative effects of fertilizer application on alfalfa yield were studied by meta-analysis. The analyses included a heterogeneity test, comprehensive effect size calculation, publication bias test, and influence factor analysis. Results showed that fertilization could improve alfalfa yields by 15.4%−198.2% because of increased soil nutrition. The combined application of organic and inorganic fertilizers had an obvious effect on increasing alfalfa yield. Application of a single organic fertilizer significantly increased alfalfa yields compared with that in the control group by 69.9% ($P<0.05$). The response of alfalfa yield to fertilization varied according to the growth environment. The application of phosphate, potassium, and organic fertilizers should be emphasized during the planting of alfalfa in arid and semi-arid areas. The combined application of organic and inorganic fertilizers is suitable for application to semi-arid areas, and the alfalfa yield increased by 50.5% ($P<0.05$). When potassium fertilizer was applied, the alfalfa yield in arid areas significantly increased compared that in the control group by 49.8% ($P<0.05$). The response of alfalfa yield to fertilization varied according to the soil type. Organic fertilizer was suitable for application to semi-humid areas, and alfalfa yields increased by 70.1% ($P<0.05$); this increase rate was much higher than that achieved by chemical fertilizer. Azophoska was suitable for application to humid areas, and alfalfa yields increased by 29.2% ($P<0.05$). Application of organic fertilizer to soils with low nutrient contents, such as chestnut and loessial soils, significantly improved alfalfa yields by 37.2% and 101.9% ($P<0.05$), respectively. Compared with other types of fertilizer, phosphate fertilizer increased the yield of alfalfa planted in dark loessial soils the most, and the alfalfa yield increased by 183.0% ($P<0.05$). The application of combined fertilizer was also suitable for saline fluvo-aquic soil, and alfalfa yields increased by 49.6%−50.9% ($P<0.05$). This increase rate was much higher than that obtained from single fertilization. The effect of chemical fertilizers on alfalfa yield was not significant when the crop was planted in lime concretion black soil. Our results suggest that fertilization enhances alfalfa yield. The combined application of organic and inorganic fertilizers is an optimal strategy for increasing alfalfa yield. This strategy provides a means for farmers to enhance the sustainability of alfalfa systems through fertilization management.

Key words: alfalfa; feritilizer application; yield; meta-analysis